

전력변환기 병렬운전을 위한 펄스폭 정보를 이용한 새로운 통신방식

New Communication Method using Pulse Width Information for Power Converter Parallel Operation

김동환¹, 최성철², 레동부³, 박성준⁴, 박성미^{5*}

Dong-Whan Kim¹, Seong-Cheol Choi², Tuan-Vu Le³, Sung-Jun Park⁴, Seong-Mi Park^{5*}

〈Abstract〉

Recently, demand for technology for energy economy and stable supply is increasing due to the increase in power demand of loads. The amount of DC power generation using new and renewable energy is noticeably increasing, and the use of DC power supplies is also increasing due to the increase in electric vehicles and digital loads. During parallel operation to increase the capacity of the power converter, the module bus method or the method using Can communication and serial communication has significant difficulties in smooth operation due to communication time delay for information sharing. Synchronization of information sharing of each power converter is essential for smooth parallel operation, and minimization of communication time delay is urgently needed as a way to overcome this problem. In this paper, a new communication method using pulse width information is proposed as a communication method specialized for parallel operation of power converters to compensate for the disadvantage of communication transmission delay in the existing system. The proposed communication method has the advantage of being easily implemented using

1 주저자, 전남대학교 전기공학과, 석박사통합과정

E-mail: kimandkim1@naver.com

2 참여저자, 전남대학교 전기공학과, 석사과정

E-mail: tjdcjf9553@naver.com

3 참여저자, (주) 지엔이피에스, 책임연구원

E-mail: tvle@epskorea.kr

4 참여저자, 전남대학교 전기공학과, 교수

E-mail: sjpark1@jnu.ac.kr

5* 교신저자, 한국승강기대학교 승강기공학부, 부교수

E-mail: seongmi@klc.ac.kr

1 Main Author, Dept. of Electrical Engineering, Combined master's-PhD

2 Co-author, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Master Course

3 Co-author, G&EPS, Responsible Researcher

4 Co-author, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Professor

5* Corresponding, Dept. of Lift Engineering, Korea Lift College, Associate Professor

the PWM and Capture function of the microcomputer. In addition, the DC/DC converter for DC distribution was verified through simulation and experiment, and it has the advantage of easy capacity expansion when applied to parallel operation of various types of power converters as well as DC/DC converters.

Keywords : Power converter, Parallel operation, Communication method, DC/DC converter

1. 서론

최근 부하 수요 증가에 따라 에너지 효율 향상과 안정적인 공급을 위한 기술적 요구가 증가하고 있다. Fig. 1을 보면 신재생에너지를 이용한 직류 발전량이 눈에 띄게 증가하고 있으며, 전기차 및 디지털 부하의 증가로 인해 직류 전원 공급장치의 사용량도 증가하고 있다[1].

이에 따라 신재생에너지원, 에너지저장장치 등 마이크로그리드 시장의 보급이 확대되고 있으며, 마이크로그리드는 태양광발전, 풍력발전, 디젤발전, 배터리 등 다양한 분산전원 시스템으로 구성된다[2][3].

마이크로그리드는 공급 전압에 따라 교류(AC)형 마이크로그리드와 직류(DC)형 마이크로그리드로 구분할 수 있다. 최근 LED 조명, 전기자동차, IT

기기, 전자기기 등 직류 부하가 빠르게 증가하고 있다. 태양광 발전, 연료전지, 2차 전지를 이용한 에너지 저장 장치 등 직류 전력을 사용하는 시스템이 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 전원 공급 장치와 기기가 다양해짐에 따라 부하의 종류에 따라 교류와 직류 전력을 출력한다. 이를 위해 많은 전력 변환기와 전원 공급 장치가 개발되고 있다 [4]-[6].

또한 수요 전력 및 부하 용량 증가에 따라 신재생에너지원을 포함한 새로운 전력망의 구축이 필요하다. 이러한 마이크로그리드 시스템을 운영하기 위해서는 전력변환장치의 용량을 늘려야 한다. 그러나 단일 전력변환 스택으로는 한계가 있다. 따라서 용량을 늘리기 위해서는 복수의 전력 변환기를 병렬로 구동하는 것이 필수적이다. 이러한 전력변환기의 병렬 동작은 통신을 통해 이루어지며, 통신 속도에 따라 성능이 크게 결정된다. 병렬 구동을 위한 통신 방식 중 가장 일반적인 통신 방식은 RS485를 이용한 MODBUS 통신이다. 하지만 이 방식은 송수신이 동시에 이루어질 수 없는 반이중 통신 방식이라는 한계가 있다. 반이중 통신의 경우 통신 대상의 수가 많아질수록 통신주기가 길어지고 제어 속도가 저하되는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 방법이 연구되고 있으며, 대표적인 방법이 4선식 통신 방식이지만 이는 통신 선로가 긴 경우 시스템 구성 시 경제적인 부담을 준다[7][8].

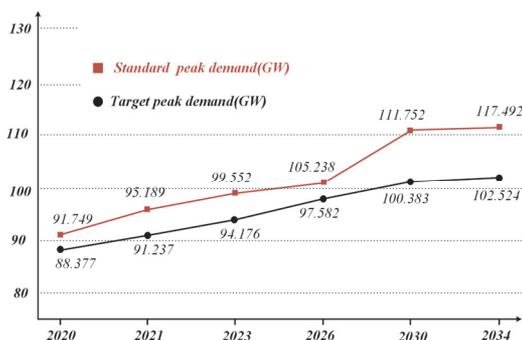


Fig. 1 Demand management forecast graph

따라서 병렬 운전 시 속도를 최적화하기 위한 통신 방식에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 전력변환기의 용량을 증가시키기 위한 병렬운전 시 모듈버스 방식이나 Can 통신 및 시리얼 통신을 사용하는 방식은 정보 공유를 위한 통신 시간 지연으로 인해 원활한 운전에 상당한 어려움이 있다. 원활한 병렬 운전을 위해서는 각 전력변환기의 정보 공유 동기화가 필수적이며, 이를 극복하기 위한 방안으로 통신 시간 지연의 최소화가 절실히 요구되고 있다. 본 논문에서는 기존 시스템의 통신 전송 지연의 단점을 보완하기 위해 전력변환기의 병렬 운전에 특화된 통신 방법으로 펄스폭 정보를 이용한 새로운 통신 방법을 제안한다.

2. 통신방식

2.1 직병렬 통신방식 분석

직렬통신은 하나의 신호선을 통해 1비트 단위로 데이터를 전송하는 방식이다. 직렬통신 방식은 데이터를 비트 단위로 순차적으로 전송하기 때문에 수신된 데이터의 비트 단위 시작과 끝을 구분할 필요가 있다. 데이터를 비트 단위로 분류하기 위해 데이터의 시간적 위치를 알기위한 방법은 데이터와 함께 클럭을 이용해 동기화 신호를 보내는 동기식 시리얼 통신과 시작과 끝에 해당하는 비트 정보를 별도로 보내는 비동기식 직렬통신으로 분류된다. 직렬 통신은 병렬 통신에 비해 데이터 전송 속도가 느리지만 신호 회선 수가 적기 때문에 구현이 쉽고 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 또한 통신 거리가 길다는 장점이 있어 장거리 통신에 널리 사용된다. 병렬 통신은 여러 개의 신호선을 통해 여러 비트의 데이터를 동시에 전송하는

방식을 말한다.

병렬 통신은 많은 수의 데이터 비트를 동시에 처리하는 방식으로, 짧은 시간에 많은 양의 데이터를 동시에 처리하여 데이터 전송 속도가 빠르다는 장점이 있다. 하지만 한 번에 처리하는 비트 수가 많아질수록 더 많은 데이터 회선이 필요하고 사용하는 포트 수가 증가하기 때문에 시스템 구성과 데이터 처리가 복잡하고 비용이 많이 든다는 단점이 있다.

또한 신호 회선 수가 많아 장거리 통신에는 적합하지 않으며, 회선 간 누화로 인해 데이터 무결성 문제가 발생한다. 통신 회선의 누화를 방지하기 위해 나선형 방식에서는 크로스오버를, 리턴 방식에서는 대칭 배열을, 단거리 리턴 방식에서는 압신기를 사용한다. 일반적으로 전력변환기의 병렬(직렬) 동작은 장거리 통신에 유리하며, 시스템 구현 및 비용의 장점으로 인해 실제 산업 현장에서 사용되는 대부분의 기기는 병렬 통신보다 신호 회선 수가 적고 보다 안정적인 직렬 통신 방식을 사용하고 있다[9][10]. 업계에서 주로 사용되는 통신방식은 모듈 버스 방식이지만, CAN 방식은 비동기 통신 방식이다. 비동기 통신은 동기 통신 방식과 달리 동기화를 위한 별도의 클럭 신호 없이 데이터의 전송 시간에 따라 통신 장치 간에 임의로 데이터를 교환하는 방식이다. 클럭 신호를 사용하지 않기 때문에 송신기는 데이터를 전송하기 전에 시작 비트를 통해 수신기에 통신 시작을 알린 후 실제 데이터를 전송해야 한다. 송신기는 시작 비트 전송 후 실제 데이터를 비트 단위로 전송하고, 마지막에 통신 종료를 알리는 정지 비트를 전송하여 수신자에게 통신이 끝났음을 알린다. 동기 통신과 비동기 통신에는 각각 장단점이 있다. 동기 통신은 비동기 통신에서 사용하지 않는 클럭 신호용 회선을 추가해야 하므로 회선 수가 더 많이 필요하다는 단점이 있다. 비동기 통신은 송신

회선과 수신 회선 두 개만으로 두 대의 기기가 동시에 데이터를 주고받는 전이중 통신이 가능하다. 하지만 통신 속도 측면에서는 동기 통신 방식이 더 유리하다. 동기 통신 방식에서는 클럭 신호를 동기화에 사용함으로써 데이터 길이 제한 없이 1 바이트 이상의 데이터를 연속적으로 전송할 수 있다. 하지만 비동기 통신에서는 실제 데이터 앞뒤에 시작 비트와 정지 비트가 반드시 포함되어야 하기 때문에 데이터만 연속적으로 전송하는 것이 불가능하다. 이는 1바이트의 데이터를 전송하기 위해 시작 비트와 정지 비트를 포함하여 최소 10 비트 이상의 신호를 전송해야 하기 때문에 동기 통신 방식에 비해 효율이 낮다는 단점이 있다[11].

또한 동기 통신과 비동기 통신에는 또 다른 중요한 차이점이 있다. 비동기 통신 방식을 사용하는 경우, 통신에 참여하는 송신 장치와 수신 장치는 동등한 상태에서 일대일 통신을 수행한다. 따라서 송신기와 수신기 모두 원하는 시간에 상대방에게 데이터를 전송할 수 있다. 비동기 통신 방식을 사용하는 경우, 통신에 참여하는 송신 장치와 수신 장치는 동등한 상태에서 일대일 통신을 수행한다. 따라서 송신기와 수신기 모두 원하는 시간에 상대방에게 데이터를 전송할 수 있다. 그러나 동기 통신에서는 송신기와 수신기 사이에서 한쪽이 데이터 전송의 주도권을 가진 마스터가 되고 다른 쪽은 슬레이브가 되어 통신을 수행한다. 이때 마스터 장치는 데이터 전송에 필요한 동기화 신호인 클럭을 출력하고 슬레이브는 마스터로부터 동기화 클럭 신호를 수신하여 동작한다. 따라서 마스터는 항상 통신에서 주도적인 역할을 하며 데이터 전송 타이밍을 결정한다. 일반적으로 산업용에 적용되는 다양한 종류의 마이크로프로세서 및 각종 주변 장치들은 이러한 마스터/슬레이브 기반의 송수신 장치를 갖는 병렬 동기 통신 방식을 주로 사용한다. 이때 제어를 담당하는 프로세서가

주로 마스터로 동작하고 산업용 주변장치는 슬레이브로 동작한다.

2.2 RS485 직렬 버스 통신

RS-422와 마찬가지로 RS-485의 전기적 사양은 EIA(전자산업협회)에서 규정하고 있지만 커넥터와 핀의 물리적 사양은 규정되어 있지 않다. 이 때문에 대부분의 RS-485 핀 규칙은 사용자 정의로 인해 사용되며, 일반적인 사양의 핀 규칙은 일반적인 +, - 또는 TXD, RXD 사양으로 사용된다. RS-485는 RS-232나 RS-422와 달리 실시간 양방향 통신인 전이중(Full Duplex)이 아닌 반이중(Half Duplex) 전송 방식만 지원한다. 따라서 RS-485는 모든 마스터 장치가 공유하는 TXD 신호선(멀티포인트 버스)에 데이터가 전송될 때마다 연결 또는 단락하여 여러 통신 장치를 제어할 뿐만 아니라 모드에 따라 RXD 신호도 동일하게 제어한다.[12]

Fig. 2를 보면, RS-485의 신호선은 RS-232와 같이 하나의 신호선에 두 개의 선이 필요하며, 각

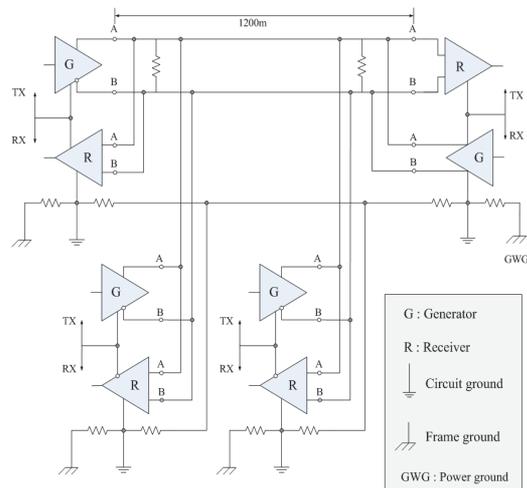


Fig. 2 RS-485 2-wire multidrop network

신호선은 +와 -로 나뉜다. 따라서 멀티 포인트 버스에서 일반적으로 RXD 및 TXD 신호 라인을 사용하므로 하나의 마스터 장치는 멀티 포인트 버스를 출력과 입력으로 나누어 사용해야 한다. RS-485 통신에는 Echo와 Non Echo 모드 두 가지 유형이 있다. RS-485의 Echo 모드는 장치 자신이 보낸 데이터를 다시 자신에게 받아서 통신을 수행하는 것으로 만약 정보가 같지 않거나 데이터 개수가 다르면 데이터 충돌로 판단하여 일정 시간 지연 후 다시 출력한다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 RS-485는 멀티포인트 버스를 사용하여 데이터를 공유하기 때문에 하나의 버스에 여러 마스터 장치가 연결된다. 따라서 하나의 마스터 장치가 통신하면 다른 장치는 출력을 중지해야 한다. 이 원리는 RS-422의 멀티 드롭 모드와 동일하다. 여러 마스터 장치를 동시에 출력할 때 데이터가 충돌하는 문제는 각각의 소프트웨어를 통해 해결해야 한다[13]. 직렬 버스 통신 방식은 직렬통신에서 하나의 통신 패킷을 여러 모듈이 동시에 수신할 수 있는 멀티 드롭을 지원하는 통신 방식을 말한다. 직렬 버스 통신 방식은 산

업용 제어 시스템에서 가장 많이 사용되는 방식이며, 대표적인 직렬 버스통신 방식 표준은 RS-485 (TIA-485, EIA-485)이다.

직렬 버스 통신 방식은 직렬 통신에 비해 몇 가지 장단점이 있다. 우선 가장 큰 차이점은 직렬 통신 방식은 1:1 방식이지만, 직렬 버스 통신 방식은 N:N 통신이 가능하다는 것이다. 직렬 통신 방식에서는 1:1 통신 방식의 문제점을 해결하기 위해 SPI 통신 표준에서는 칩 선택 회선을 통해 해당 장치만 활성화하여 통신하거나, 라우터와 동일한 방식으로 패킷을 전송하는 형태를 취하고 있다. 라우터 방식이 가장 일반적으로 선택되는 형식이지만 라우터 방식은 패킷을 전달하기 때문에 전송 시간이 길어진다. 따라서 응답 속도가 느려진다. 또한 라우터 방식은 여러 개의 시리얼 통신 포트와 라우터 등의 장비 구성이 필요하기 때문에 비용이 증가한다. 반면 RS-485 통신 방식의 경우 노드당 하나의 포트만으로 N:N 통신이 가능하기 때문에 구축 비용이 매우 저렴하다. 하지만 시리얼 버스 통신 방식은 몇 가지 단점도 있다. 가장 큰 단점은 모든 노드가 패킷을 수신하기 때문에 수신된 패킷을 처리해야 한다는 것이다. 노드가 패킷을 수신하면 해당 패킷과 관련이 없는 모든 노드가 패킷의 수신자를 확인하거나 처리하는 등의 프로세스를 수행한다[14]. 따라서 직렬 통신 방식보다 전력 소비가 높고 수신 중 저전력 모드 관리가 불리하다. 직렬 통신 방식의 패킷 전달은 라우터에서 처리해야 한다는 단점도 있다. 그리고 두 번째 단점은 노드 수가 제한되어 있다는 것이다. 직렬 통신 방식은 노드가 회선을 공유하기 때문에 회선 내 노드 수가 증가함에 따라 커패시턴스가 발생한다. 따라서 노드 수가 증가함에 따라 통신 속도가 제한되어 결국 최대 노드 수에 제한이 생길 수 있다. 그러나 직렬 통신 라우팅 방식의 경우 노드 수에 제한이 없다.

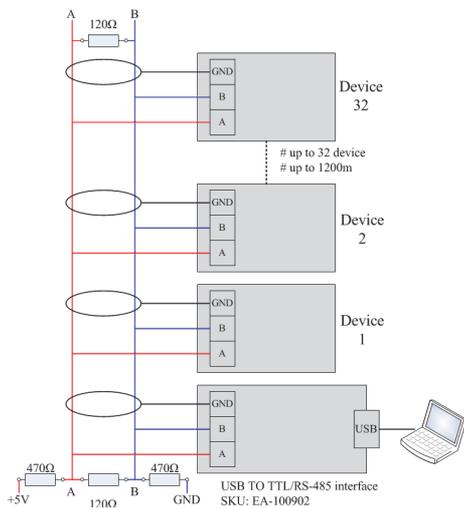


Fig. 3 Controlling multiple devices using RS-485

대표적인 예로 직렬 통신 방식이 발달한 이더넷의 경우 수천 대의 컴퓨터와 연결되어 있다. MODBUS는 네트워크에 연결된 장치들 간의 클라이언트/서버 통신을 위한 프로토콜로, Fig. 4와 같이 통신 회선 버스를 이용하여 연결하거나 다른 형태의 네트워크 장치와 병렬로 연결하기 때문에 산업 분야에서 가장 많이 사용되고 있다[15].

MODBUS의 전송 모드는 데이터 인코딩 방식에 따라 MODBUS RTU(원격 터미널 유닛)와 MODBUS ASCII의 두 가지가 있다. Fig. 5는 각각 RTU 모드와 ASCII 모드의 프레임 구조를 보여준다.

Fig. 5를 보면, RTU는 3.5자 이상의 공백을 통해 각 프레임을 구분하고 HEX 값으로 데이터를 전송하는 반면, ASCII는 프레임의 시작을 ';'으로, 끝을 'CR과 LF'로 구분하여 각 프레임을 구분한다. RTU 모드와 ASCII 모드의 기능적 차이점은 RTU 모드에서는 데이터가 하나의 8비트 바이너리 형식으로 전송된다는 것이다. ASCII 모드는 한 문자를 4비트로 나누어 두 개의 문자로 전송하기 때문에 RTU 모드보다 시간이 오래 걸린다. 이 때

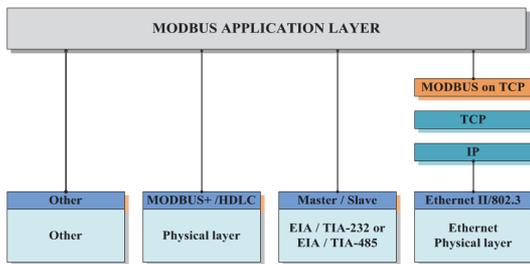


Fig. 4 MODBUS communication stack

Modbus RTU Frame Format					
Start	Address	Function	Data	CRC	End
≥3.5 char	8 bit	8 bit	N * 8 bit	16 bits	≥3.5 char

Modbus ASCII Frame Format					
Start	Address	Function	Data	LRC	End
;	2chars	2chars	N * 1 chars	2chars	CR, LF

Fig. 5 MODBUS RTU and ASCII frame

문에 오류를 확인하거나 데이터 값을 확인하기 위한 통신 방식으로는 ASCII 모드가 유리하다. 전송 효율에 있어서는 RTU 모드가 유리하기 때문에 일반적으로 산업용 애플리케이션에서는 RTU 모드를 사용한다.

3. 새로운PWM-Capture 양방향 통신

3.1 데이터 전송용 PWM-Capture 통신

PWM은 펄스폭 변조의 약자로, 신호 정보를 펄스의 폭으로 표현하고, 펄스의 폭을 조절하여 신호의 크기를 표현할 수 있다는 의미이다. 일반적으로 전력전자 분야에서 PWM은 각종 스위치 소자(트랜지스터, IGBT, MOSFET 등)를 켜고 끄는 스위칭 신호로 사용되며, 실제로 본 논문에서는 통신 데이터 전송을 위해 하나의 PWM 신호가 사용되고, PWM을 이용한 스위칭 동작의 목적으로 두 개의 PWM 신호가 사용된다.

본 논문에서는 PWM 펄스의 폭을 이용하여 데이터 값의 크기를 표현하기 위한 목적으로 PWM을 사용하였으며, 양방향 통신을 가능하게 하기 위해 Capture 기능과 함께 사용하였다. 아래 Fig. 6은 PWM을 생성하는 방법을 보여주고 있으며, 디지털 시스템에서 PWM을 생성하기 위해서는 기

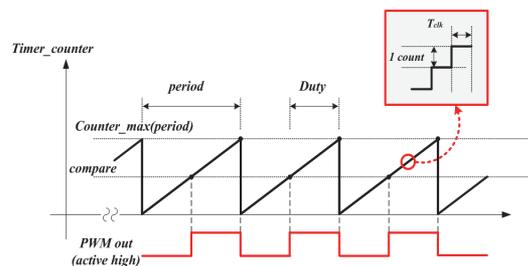


Fig. 6 Principle of PWM generation

본적으로 MCU 내부의 타이머/카운터 기능을 사용한다. 즉, 타이머의 최대값(period)과 비교 설정값(compare)을 설정하여 PWM 신호의 펄스폭을 조정한다.

16비트 타이머가 있는 MCU를 사용한다고 가정할 때, 이 16비트 타이머에서 설정할 수 있는 최대 카운터 값은 65535(0xFFFF)이다. 즉, 0에서 65535 사이의 모든 값을 펄스 폭 주기 설정 값으로 사용하여 사용자가 원하는 PWM 주기(주파수)를 생성할 수 있다.

이때 이 타이머는 설정 주파수에 따라 카운터 값의 최대값에 도달하면 다시 '0'으로 리셋되고, 카운터는 0부터 설정 주파수의 최대값까지 반복적으로 발생하여 위와 같이 삼각형 파형의 카운터 값을 생성하게 된다. 여기서 60MHz 클럭의 MCU를 예로 들면, 카운터의 최대값을 1500으로 설정하면 타이머 카운터는 0에서 1500까지 증가하는 삼각파를 생성한다. 이를 주파수로 표현하면 주파수는 40kHz, 주기는 25us인 PWM 신호이다. 카운터 값이 생성될 수 있다. Capture는 펄스 신호의 시간 정보를 검출하는 기능이다. 펄스 신호를 수신하고 카운터를 통해 펄스의 엣지 사이의 시간을 검출하여 주기, On, Off 정보 등을 측정하는 기능을 가지고 있다. 또한 펄스 엣지에 인터럽트

를 발생시켜 외부 신호의 엣지와 동기화함으로써 특정 제어를 수행할 수 있다.

Fig. 7은 입력 신호의 상승 엣지와 하강 엣지를 모두 감지하는 시차(delta) 상승 및 하강 에지 모드. CEVTx가 발생하면 카운터가 리셋된다는 사실을 이용하여 각 펄스의 순수한 주기와 펄스 폭을 감지할 수 있다.

엣지에서 CEVTx가 발생하면 카운터는 자동으로 '0'으로 재설정되므로 Capture 카운터에 의한 각 펄스의 주기와 주파수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 DUTY_{1(OV)} &: CAP_2, & DUTY_{1(OFF)} &: CAP_3 \\
 DUTY_{2(OV)} &: CAP_4, & DUTY_{2(OFF)} &: CAP_1 \\
 Period_1 &: CAP_2 + CAP_3, \\
 Period_2 &: CAP_4 - CAP_1
 \end{aligned} \tag{1}$$

3.2 제안하는 PWM-Capture 통신 프로토콜

본 논문에서 제안하는 새로운 통신 방식은 PWM과 Capture 기능을 이용한 전력변환기의 병렬 동작에 적합한 고속 통신 기법이다. 제안한 통신 방식은 주기와 시간비라는 두 가지 정보를 가진 PWM 신호에서 주기와 시간비가 다른 일련의 PWM 신호에 여러 정보를 적재할 수 있다는 점을 이용한다.

기존 bps 기반의 직렬 통신 방식과 달리 Capture 에서 하나의 PWM 신호의 사이클과 시간비에 대한 정보를 얻기 위해서는 한 사이클에 상승 엣지 와 하강 엣지가 있어야 한다.

위의 조건을 만족하기 위해 시간비 (d)는 다음과 같은 제약 조건이 필요하다.

$$0 < d_{min} < d < d_{max} < 1 \tag{2}$$

d_{min} : 최소 시비율, d_{max} : 최대 시비율

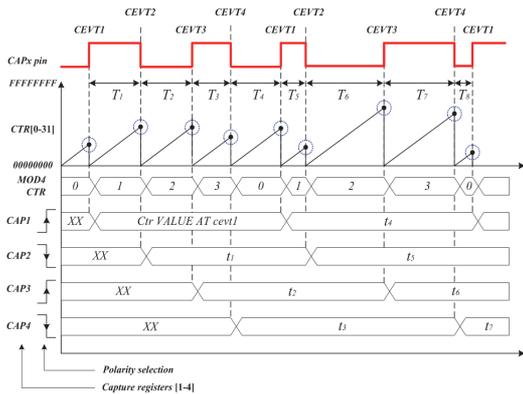


Fig. 7 Timed rising and falling edge modes

최소 시간 비율과 최대 시간 비율은 DSP의 Capture에 필요한 시간과 라인으로 인한 신호 지연에 맞게 설정한다. Capture 단자에서 PWM의 시간비는 상승 엣지와 하강 엣지의 비율이어야 한다.

본 논문에서는 PWM의 한 주기에서 상승 엣지와 하강 엣지 Capture 신호가 발생한다는 가정하에 통신 프로토콜을 제안한다. Fig. 8은 본 논문에서 제안한 PWM Capture를 이용한 새로운 통신 방식이다.

Fig. 8(a)에서 T_s 는 PWM 사이클에서 T_{dp} 와 T_e 로 정의한다. T_s 는 직렬 N 데이터의 시작 신호 정보로 사용되며, T_{dp} 는 데이터 신호에 대한 정보로, T_e 는 정지 신호 정보로 사용한다. 시작 신호의 PWM은 T_s 이고 시간 비율은 0.5이다. T_{dn} 은 High로 유지된 T_{d1} 에서 N개의 데이터 정보로 사용한다. T_c 는 데이터 전송의 신뢰성을 검증하기 위한 CRC용 데이터로 사용한다. 다양한 PWM 주기를 이용한 통신 방법을 고려할 수 있다.

본 논문에서는 다음과 같은 제약 조건으로 3가지 사이클 크기를 사용하였다.

$$T_s < T_e < T_{dp} \quad (3)$$

방정식 (3)과 같은 제약 조건은 DSP의 Capture

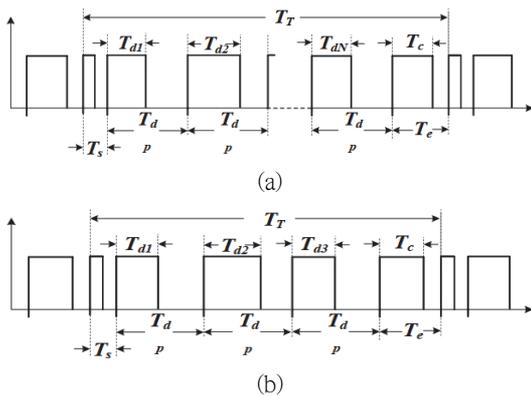


Fig. 8 New communication using PWM-capture

로 인해 직렬 PWM 사이클 값에서 최소 사이클을 감지하여 시작 신호 감지를 용이하게 하는 이점이 있다. 시작 및 중지 주기는 데이터 전송 시간을 쉽게 계산할 수 있도록 방정식 (4)로 정의한다.

$$T_s + T_e = T_{dp} \quad (4)$$

N개의 데이터를 전송하는 데 필요한 총 시간은 방정식 (5)와 같이 정의한다.

$$T_T = (N+1) \cdot T_{dp} \quad (5)$$

T_{dp} 인 데이터 신호에 대해 PWM에서 전송할 수 있는 이론적 최대값은 방정식 (6)에 나와 있다.

$$CAP_{max} = ck \cdot T_{dp} \quad (6)$$

그러나 PWM 신호는 식 (2)에 의해 제한되며 데이터 정보의 범위는 다음과 같다.

$$0 \leq DATA \leq (d_{max} - d_{min}) \cdot ck \cdot T_{dp} \quad (7)$$

주변 하드웨어가 구축됨에 따라 식 (7)과 같이 데이터의 정도를 증가시키기 위해 PWM 주기 T_{dp} 에 의해 결정된다. T_{dp} 를 크게 하면 데이터를 늘릴 수 있지만 데이터 전송 시간이 짧아지는 단점이 있다. 파워 컨버터의 고속 병렬 동작은 파워 컨버터의 제어 샘플링 주기와 동일하다. 이 경우 마스터 제어 명령이 슬레이브 컨트롤러로 전달되는 데이터 지연이 샘플링 주기가 된다. 이러한 고속 컨트롤러를 구성하려면 방정식 (8)과 같이 Fig. 8의 컨트롤러 샘플링 주기 및 통신 프로토콜의 총 주기와 동일하게 구성한다.

$$T_T = T_{sw} \quad (8)$$

단, T_{sw} : Sampling cycle of controller

통신 프로토콜의 전체 사이클을 식 (8)과 같이 정의하면 마스터에서 슬레이브로 전송되는 정보의 양에 제한이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 8(b)와 같이 마스터에서 슬레이브의 전압 명령 (T_{d1}), 전류 명령(T_{d2}), 마스터 제어 상태(T_{d3})를 전달하여 고속 병렬 동작을 수행한다. 시작 신호 Ts는 T_{d1} 의 20 [%]로 정의되고 Tc는 T_{d1} 의 80[%]로 정의된다. 방정식 (2)의 제약 조건에서 최소 시간 비율(d_{min})은 0.1, 최대 시간 비율(d_{max})은 0.9로 정의되었다.

4. 시뮬레이션 결과

Fig. 9는 제안한 고속 통신 방법의 유효성을 검증하기 위한 Psim 시뮬레이션 회로도이다. 시뮬레이션은 센싱 부분, 부하 부분, 마스터 전력변환 부분, 슬레이브 전력변환 부분으로 구성된다.

마스터 섹션 dll에서 전압 제어와 전압 명령 및 동작 모드가 있는 전류 명령은 COM Q 신호를 통해 PWM 통신을 생성하고 슬레이브 모듈은 Capture 신호를 사용하여 마스터 정보를 획득한다. 통신 프로토콜은 Fig. 8(b)와 같이 정의되어 있다. 시뮬레이션 설정 값은 Table 1에서 보여주고 있다. 카운터 클럭은 DSP TMS28025의 클럭 주파수와 동일한 방식으로 100[Mhz]로 사용한다.

Fig. 10은 제안한 PWM-캡처 통신 방식을 분석하기 위한 파형을 보여준다. 스위칭 PWM 카운터와 PWM 커맨드 카운터 값, 스위칭 신호, 통신 PWM 신호, 나가는 캡처 카운터 값, 통신 PWM 모드 신호가 표시되어 있다. 캡처 카운터 값과 통신을 위한 PWM 모드를 위한 COM_OUT 신호를 보면 캡처 카운터 250과 시간 비율이 0.5일 때 시작 신호가 된다. 캡처 카운터 D1-1250, D2-0.25, D3-0.5, D4-0.75의 시간비는 3개의 시리얼 데이

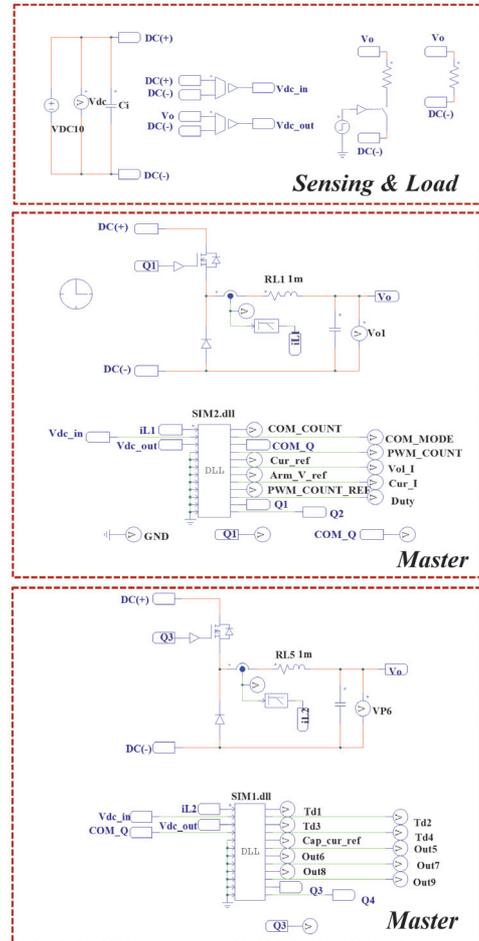


Fig. 9 Simulation Circuit Diagram

Table 1. Simulation settings

Parameter	Value
Clock frequency	100[Hz]
Sample frequency frequency	20[kHz]
Data number	3
Max. value of counter for sampling	5000
Data counter maximum value	1250
Valid Data Ratio Range	0.1-0.9
Valid Data Counter Maximum Value	1000
Start counter maximum value	250
End counter maximum value	1000
Maximum value of CRC ratio	0.5

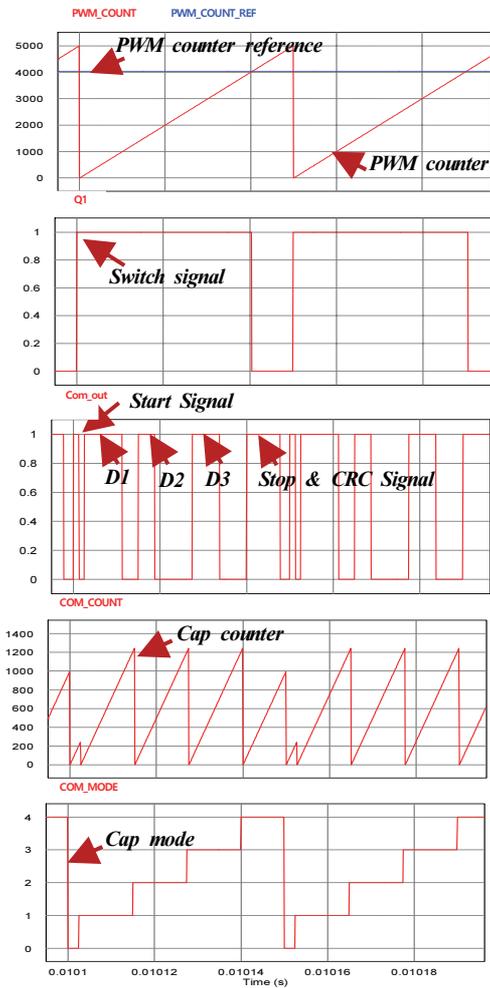


Fig. 10 Communication simulation result

터 신호이다. 캡처 카운터 1000, Stop이 사용되며, 시간 비율은 CRC 신호이다.

Fig. 11은 전력변환기 병렬 동작의 거시적 특성을 분석하여 통신을 위한 PWM 신호, 마스터 슬레이브의 전류 명령, 마스터 슬레이브의 인덕터 전류 및 출력 전압을 보여준다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 통신을 위한 PWM 신호는 마스터 및 슬레이브 전류 명령과 동일한 값을 가지므로 실제 두 전류는 동일하다.

특히 30 [msec], 5 [kW], 10 [kW] 부하 변동



Fig. 11 Parallel operation result

에서 출력 전압은 약 4.4 [%]였으나 5 [msec] 이후에는 정상이다.

Fig. 12는 Fig. 11에서 병렬 동작으로 동작할 때 31[msec] 부근의 확대 파형을 보여준다. Fig. 12는 PWM 신호의 전류, 통신 모드, 마스터 슬레이브의 전류 명령, 마스터 슬레이브의 스위칭 시간, 마스터

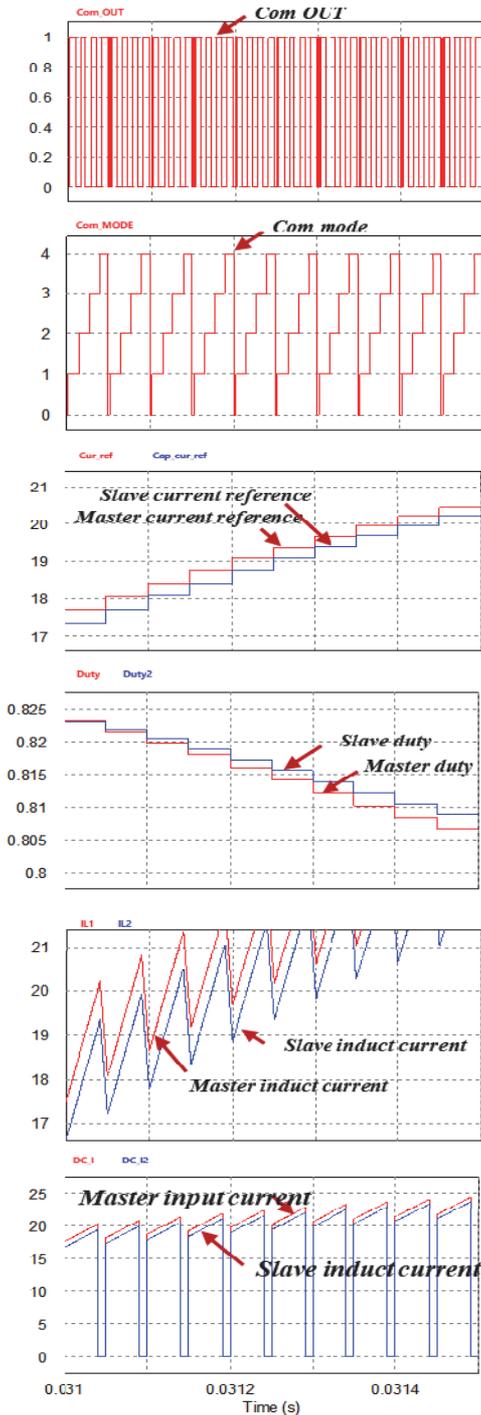


Fig. 12 Expansion waveform of parallel operation result

슬레이브의 인덕터 전류, 마스터 슬레이브의 입력 전류를 보여준다. 통신 모드는 시작 모드, 3가지 데이터 모드, 정지 모드로 표시된다. 동기화 시에는 통신을 위한 PWM 신호가 발생한다.

또한 전류 명령은 그림과 같이 슬레이브 전류 명령이 마스터 전류 명령보다 한 샘플링 지연되는 것을 나타내며, 이로인해 발생하는 현상이다. 부하가 이동하면 마스터 전류가 슬레이브 전류보다 약간 커지는 것을 알 수 있다.

그러나 정전류 명령이 있는 정상 상태의 경우 두 전류가 동일함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 전력 수요 증가에 따른 전력변환기의 대용량화에 따른 병렬운전에 따른 병렬운전 특성을 개선하기 위해 PWM과 Capture 기능을 이용한 새로운 통신 방법을 제안하였다. 제안한 통신 방식은 일련의 PMW 신호의 주기와 듀티 비율을 제어 신호와 데이터 신호로 사용하여 통신한다.

제안한 통신 방법을 두 세트의 DC/DC 컨버터에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 시스템 클럭 주파수를 분배하고 클럭 주파수를 통신에 사용하는 모듈 버스 방식이나 캔 통신 방식과 같은 기존의 직렬통신방식과 비교했을 때, 제안한 통신방식은 시스템 클럭 주파수를 분배하고 그 클럭 주파수를 통신에 사용한다. 제안한 방식은 통신 클럭을 시스템 클럭으로 사용함으로써 통신 속도를 크게 향상시킨다.
- 제안한 통신방식에서는 100 [MHz] 클럭을 사용하는 시스템에서 50 [usec]동안 3개의 10bit 데이터 전송이 가능함을 확인하였다.
- 100 [MHz] 클럭을 사용하여 20 [kHz] 스위칭 주파수로 동작하는 DC/DC 컨버터 2세트를

병렬로 동작시킨 결과, 마스터에서 슬레이브로 제어 데이터를 전송할 때 샘플링 지연에 의한 병렬 동작 특성이 우수한 것을 확인하였다.

제안한 통신방식은 DC/DC 컨버터뿐만 아니라 다양한 형태의 전력변환기의 병렬 동작에 적용 시 용량 확장이 용이하다는 장점이 있다.

사 사

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-002).

참고문헌

- [1] U. S. Energy Information Administration, "Annual Energy outlook 2013 with Projections to 2035," April 2013.
- [2] "Micro-grids architectures, stability and protections," IEEE 394J-10 Distributed Technologies, 2012.
- [3] M. Lexuan 외, "Tertiary and secondary control levels for efficiency optimization and system damping in droop controlled dc-dc converters," IEEE Transactions on Smart Grid, 2015.
- [4] N. H. Kutkut, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Charge equalization for series connected battery strings," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 3, pp. 562–568, May/June. 1995.
- [5] W. F. Bentley, "Cell balancing considerations for lithium-ion battery systems," in Proc. 12th Annu. Battery Conf. Appl. Adv., Jun. 12-17, pp.223-226, 1997.
- [6] T. Gottwald, Z. Ye, and T. Stuart, "Equalization of EV and HEV batteries with a ramp converter," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 33, pp. 307-312, Jan. 1997.
- [7] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Charge equalization for an electric vehicle battery system," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 34, no. 1, pp. 235–246, Jan. 1998.
- [8] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, and D. W. Novotny, "Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 35, no. 1, pp. 28–35, Jan./Feb. 1999.
- [9] C. S. Moo, Y. C. Hsieh, and I. S. Tsai, "Charge equalization for series connected batteries," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 39, no. 2, pp. 704–710, Apr. 2003.
- [10] Y. S. Lee, and M. W. Cheng, "Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 5, pp. 1297–1307, Oct. 2005.
- [11] J. Cao, N. Schofield, and A. Emadi, "Battery balancing methods: A comprehensive review," in Proc. IEEE Veh. Power Propulsion Conf., pp. 1–6, Sep. 2008.
- [12] S.-E. Cho and S.-M. Park, "A Study on Multilevel Communication Drive of Full-Duplex Method with Security," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol. 23, no. 1, pp. 41–48, Feb. 2020.
- [13] M. Y. Kim, J. W. Kim, C. H. Kim, S. Y. Cho, "Automatic charge equalization circuit based on regulated voltage source for series connected lithium-ion batteries," in Proc. 8th Int. Conf. Power Electron. ECCE Asia, pp. 2248-2255, Jun. 2011.
- [14] A. M. Imtiaz, F.H. Khan, H. Kamath, "A low cost time shared cell balancing technique for future lithium-ion battery storage system featuring regenerative energy distribution," in Proc 26th Applied Power Electron. Conf., March. 2011.
- [15] M. Uno, and K. Tanaka, "Accelerated charge-discharge cycling test and cycle life prediction model for supercapacitors in alternative battery applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 12, pp. 4704–4712, Dec. 2012.